文章编号:1000-4939(2023)05-1143-11

单轴压缩条件下溶蚀岩体力学特性数值试验研究

史文兵[1,2],李华[1],王小明[3],梁风[1,2]

(1. 贵州大学资源与环境工程学院,550025 贵阳;2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室,550025 贵阳;3. 中南大学土木工程学院,410075 长沙)

摘 要:工程尺度的溶蚀岩体难以开展室内外力学试验,导致溶蚀岩体的力学参数获取存在困难,因此基于岩石矿物含量特征、室内力学试验和岩体结构面特征,采用三维颗粒流离散元法,通过建立等效孔隙型溶蚀岩体模型进行单轴压缩数值试验,进而分析其力学特性和变形破坏机制。研究表明:采用改进平行黏结模型,基于细观矿物特征,通过元胞自动机算法剔除颗粒可建立孔隙型溶蚀岩体模型;加载前期,岩体结构面首先快速破坏而产生以剪切为主的微裂纹;随加载进行,岩块内逐渐产生以拉裂纹为主的破坏,其微裂纹呈指数增加,而结构面微裂纹先激增后趋于稳定;相同轴向应变时,岩块内拉裂纹随溶蚀率增加而增加,而结构面剪切微裂纹减少;岩体的变形破坏分为结构面快速破坏、岩块弹性变形、岩块塑性变形和岩体完全破坏等 4 个阶段,其破坏形式随溶蚀率增加而从整体均匀性破坏转化为局部结构性破坏;溶蚀使岩体强度降低,溶蚀率与单轴抗压强度和变形模量分别呈反比和负指数函数关系。

关键词:溶蚀岩体;离散元法;单轴压缩;力学特性;岩体强度

中图分类号:TU452 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.020

Numerical test on the mechanical properties of dissolution rock mass under the uniaxial compression condition

SHI Wenbing[1,2], LI Hua[1], WANG Xiaoming[3], LIANG Feng[1,2]

(1. Resources and Environmental Engineering college, Guizhou University, 550025 Guiyang, China;
2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, 550025 Guiyang, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, 410075 Changsha, China)

Abstract: It is difficult to carry out laboratory and field mechanical tests on engineering-scale dissolution rock mass, which leads to great difficulty in obtaining mechanical parameters of the dissolution rock mass. Therefore, based on the characteristics of rock mineral content, laboratory mechanical tests, and rock mass structural plane characteristics, three-dimensional particle flow of discrete element method was adopted to conduct a uniaxial compression numerical test by establishing an equivalent dissolution rock mass model. Finally, the mechanical properties and deformation failure mechanism are analyzed. Based on the characteristics of meso-minerals and macro-structural planes, the research shows that the establishment of an e-

收稿日期:2021-03-23 **修回日期**:2022-01-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 42067046);贵州省科技计划资助项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 228)
通信作者:史文兵,教授。E-mail:wbshi@gzu.edu.cn
引用格式:史文兵,李华,王小明,等. 单轴压缩条件下溶蚀岩体力学特性数值试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1143-1153.
SHI Wenbing, LI Hua, WANG Xiaoming, et al. Numerical test on the mechanical properties of dissolution rock mass under the uniaxial compression condition[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1143-1153.

quivalent dissolution rock mass model can truly reflect the mechanical behavior of it. In the early stage of loading, the structural plane of rock mass was quickly destroyed to produce micro-cracks mainly of shear. However, with the loading progressing, tensile failure occurred gradually in the rock mass, and its micro-cracks increased exponentially, while the micro-cracks of the structural plane surged first and then stabilized. Under the same axial strain, the internal tensile cracks in the rock block increase by the dissolution rate, but the shear microcracks on the structural plane decrease. The deformation and failure of the rock mass can be divided into four stages: rapid failure of the structural plane, elastic deformation of the rock, plastic deformation of the rock, and complete failure of the rock mass. The failure form of the rock mass transitions from the overall-uniform failure to the local-structural failure with the increase of the dissolution rate. dissolution reduces the strength of rock mass. The dissolution rate is inversely proportional to the uniaxial compressive strength, and has a negative exponential relationship with the deformation modulus.

Key words: dissolution rock mass; discrete element method; uniaxial compression; mechanical properties; strength of rock mass

岩体内节理、裂隙等地质缺陷对其力学响应特性一直是工程界关注的重点和难点[1-3]。结构面对岩体力学性质起控制作用[4],而在约占全球地表面积 1/5,全国面积 1/3 的喀斯特地区,一定深度范围内发育着不同溶蚀程度的岩体[5-6],其力学性质不仅受结构面控制,还受到大量溶蚀孔隙、裂隙的影响,使得溶蚀岩体的力学特性更加复杂。目前,关于节理、裂隙岩体的力学特性研究取得了丰富的成果[1-2,7-11],而关于溶蚀岩体力学特性研究不多。随着工程建设不断发展,溶蚀岩体地基和边坡稳定性问题日益显著[5,12-14],喀斯特地区的岩溶缺陷对岩体力学特性的影响亟待解决。现阶段,溶蚀岩体研究往往只关注个别较大岩溶洞隙的影响,而忽视数量庞大的中小尺度岩溶洞隙对岩体力学特性的作用。

近年来,数值模拟分析成为研究溶蚀岩体力学特性的重要手段,而研究溶蚀岩体力学特性的前提是构建溶蚀岩体模型。目前,在构建溶蚀岩体模型方面的研究取得了一定的成果,如张菊明等[15]通过采用椭球洞体建立随机洞隙溶蚀岩体模型;陈祥军等[16-17]针对小尺度的岩溶洞隙建立溶蚀岩体随机结构模型;刘宏等[18]采用竖向椭圆形溶孔建立溶蚀岩体模型,进而研究了溶蚀岩体地基稳定性等力学特性;张社荣等[19-20]建立了溶蚀岩体参数完全随机场力学模型,并利用 Bayes 法约束该模型的空间变异性,进而研究溶蚀岩体坝基稳定性等力学特性。针对中小尺度溶蚀洞隙,基于现场溶蚀洞隙的统计构建随机溶蚀岩体模型的方法,已成为研究溶蚀岩体力学特性的重要手段。但建立的溶蚀岩体模型较为简单,与实际溶蚀特征匹配度不够,因此有必要构建符合实际溶蚀发育特征的岩体模型,进而对溶蚀岩体力学特性进行研究。

工程尺度的岩体现场力学试验实现较困难且费用高,现场岩体力学原型试验难以普及,而数值分析方法对溶蚀岩体力学特性研究逐渐被认可。离散元颗粒流法能逼近岩土材料的力学相应特性,在岩体力学特性方面的研究方面具有很强的优势[21]。部分学者在采用颗粒流离散元法对洞隙影响岩石(体)力学特性研究方面取得了重要进展。如黎崇金等[22]利用 PFC^{2D}研究大理岩的裂纹扩展及力学特性;杨圣奇等[23-24]利用 PFC^{2D}研究单孔和双孔洞隙对砂岩的力学特性影响;张社荣等[25]采用 PFC^{2D}从细观力学角度研究不同的溶蚀孔隙结构对灰岩力学特性的影响。学者们基于二维离散元颗粒流,从细观力学角度分析了多种孔洞对岩石力学行为特性的影响。而三维空间内,基于细观矿物组分和宏观结构面特征的溶蚀岩体的细观力学机制,有待展开进一步研究。

因此,本研究以贵州典型喀斯特地区溶蚀岩体为研究对象,基于野外调查、偏光显微镜和室内力学试验等研究手段,采用三维颗粒流离散元法建立了考虑尺寸效应的溶蚀岩体模型,进而探讨单轴压缩条件下不同溶蚀程度孔隙岩体力学特性响应。

1 颗粒流离散元法

颗粒流离散元法最早由 CUNDALL 等[26]提出,该方法将岩体离散成刚性细观颗粒(但力学关系上允许重叠),基于牛顿第二定律定义颗粒间的力学运动行为,采用接触(contact)模型来反映颗粒间的力

与位移关系。目前，在岩体力学研究领域，线性接触模型、平行黏结模型和光滑节理模型是广泛运用的 3 种接触模型。

1.1　改进的平行黏结模型

平行黏结模型（parallel bonding model，PBM）是通过平行黏结将相互接触的颗粒黏结成集合体以表征完整的岩块，可看作一组具有恒定法向和切向刚度的弹簧，均匀地分布在颗粒间接触面上。PBM 能够承受拉应力且能抵抗颗粒相对旋转，平行黏结破坏时，退化为线性接触模型[27-28]。

平行黏结力 $\boldsymbol{F}$ 与力矩 $\boldsymbol{M}$ 分成法向与切向分量，即

$$\begin{cases}\boldsymbol{F} = F_{\mathrm{n}}\boldsymbol{n} + F_{\mathrm{s}}\boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{M} = M_{\mathrm{n}}\boldsymbol{n} + M_{\mathrm{s}}\boldsymbol{t}\end{cases} \tag{1}$$

式中：F_{n}、F_{s}、M_{n}、M_{s} 分别为力与力矩的法向与切向分量大小；$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{t}$ 分别为法向与切向单位向量。在三维颗粒流中，切向分量法向力 F_{s} 和力矩 M_{s} 沿接触平面 s-t 坐标系分为 F_{ss}、F_{st} 和 M_{ss}、M_{st}。

颗粒间的相对位移及转动会引起弹性力与力矩增量，每一个计算步中，力与力矩增量为

$$\begin{cases}\Delta F_{\mathrm{n}} = -\bar{k}_{\mathrm{n}}\bar{A}\Delta\delta_{\mathrm{n}}, \Delta F_{\mathrm{s}} = -\bar{k}_{\mathrm{s}}\bar{A}\Delta\delta_{\mathrm{s}} \\ \Delta M_{\mathrm{n}} = -\bar{k}_{\mathrm{s}}\bar{J}\Delta\theta_{\mathrm{n}}, \Delta M_{\mathrm{s}} = -\bar{k}_{\mathrm{n}}\bar{I}\Delta\theta_{\mathrm{s}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\Delta\delta_{\mathrm{n}}$、$\Delta\delta_{\mathrm{s}}$ 和 $\Delta\theta_{\mathrm{n}}$、$\Delta\theta_{\mathrm{s}}$ 分别为法向、切向位移增量和相对扭矩、弯矩增量，其中，法向力拉为负，即法向位移 $\delta_{\mathrm{n}} > 0$ 为拉伸；$\bar{k}_{\mathrm{n}}$、$\bar{k}_{\mathrm{s}}$ 分别为平行黏结的法向与切向刚度，由式（3）求出；$\bar{A}$、$\bar{I}$、$\bar{J}$ 分别为平行黏结接触面积、惯性矩和极惯性矩，由式（4）求得。

$$\bar{k}_{\mathrm{n}} = \bar{E}_{\mathrm{c}}/(R_{\mathrm{A}} + R_{\mathrm{B}}),\ \bar{k} = \bar{k}_{\mathrm{n}}/\bar{k}_{\mathrm{s}} \tag{3}$$

$$\bar{A} = \pi\bar{R}^2,\ \bar{I} = \pi\bar{R}^4/4, \bar{J} = \pi\bar{R}^4/2 \tag{4}$$

式中：$\bar{R} = \lambda\min(R_{\mathrm{A}}, R_{\mathrm{B}})$，$R_{\mathrm{A}}$ 和 R_{B} 为两个相邻接触颗粒半径，$\bar{\lambda}$ 为半径乘数。

平行黏结接触面的正应力 $\bar{\sigma}$ 和剪应力 $\bar{\tau}$ 为

$$\begin{cases}\bar{\sigma} = \dfrac{-F_{\mathrm{n}}}{\bar{A}} + \dfrac{|M_{\mathrm{s}}|}{\bar{I}}\bar{R} \\ \bar{\tau} = \dfrac{|F_{\mathrm{s}}|}{\bar{A}} + \dfrac{|M_{\mathrm{n}}|}{\bar{A}}\bar{R}\end{cases} \tag{5}$$

传统的 PBM 模型很难同时满足实际岩体较高的抗压与抗拉强度之比，而文献[29]在平行黏结模型的法向分量中引入软化系数 β，能很好解决高压拉问题。定义 β 为软化刚度 $\bar{k}_u$ 与荷载刚度 $\bar{k}_l$ 之比，即 $\beta = \bar{k}_u/\bar{k}_l$，其中 $\bar{k}_l = \bar{k}_{\mathrm{n}}\bar{A}$。其中，当 $\beta\to\infty$ 时，即为传统完全脆性的 PBM 模型（图 1）。

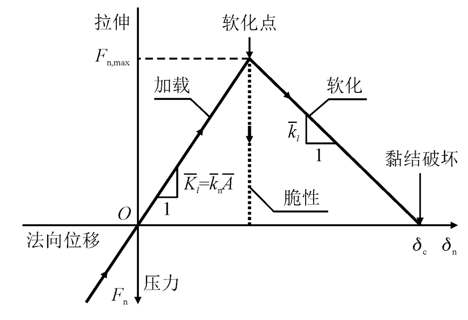


图 1　软化平行黏结模型的法向力-位移法则

Fig. 1　Normal force-displacement law of softening PBM

平行黏结的拉伸法向力 F_{n} 达到并超过法向黏结强度极限时发生软化，即软化临界为

$$F_{\mathrm{n,max}} = -\bar{\sigma}_{\mathrm{c}}\bar{A} \tag{6}$$

软化后，黏结的法向力与位移仍为线性关系。由于法向分量发生软化，破坏判据由法向黏结强度变为法向位移，即满足式（7）时发生拉伸破坏。

$$\delta_{\mathrm{n}} + \bar{R}\,|\,\bar{\theta}_{\mathrm{n}}\,| \geqslant \delta_{\max} \tag{7}$$

式中，$\delta_{\max}$ 是软化黏结最大位移量（拉伸），即

$$\delta_{\max} = \frac{\bar{\sigma}_{\mathrm{c}}}{\bar{k}_{\mathrm{n}}}\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right) \tag{8}$$

而切向分量不发生软化，其剪切黏结强度 $\bar{\tau}_{\mathrm{c}}$ 遵循库仑准则。当 $\bar{\tau} \geqslant \bar{\tau}_{\mathrm{c}}$ 时，黏结被剪断，产生剪切裂纹。当平行黏结发生剪切或拉断破坏时，模型退化为只有线弹性和摩擦作用。

1.2　光滑节理模型

光滑节理模型（smooth joint model，SJM）通过模拟节理两侧一定范围内的接触特性来反映剪胀、摩擦和黏结节理的力学特性。节理接触部位是光滑的，两侧颗粒可以相互覆盖或滑动，不同于黏结模型（PBM）中一个颗粒绕过另一个颗粒。当节理黏结断裂时，光滑节理模型退化为只具有线弹性和摩擦特性[30-31]。

在创建光滑节理模型后，黏结模型转为光滑节理模型，光滑节理模型中多数参数继承黏结模型的参数。光滑节理模型可看作为一系列弹簧均匀分布在一个颗粒间接触面[32]。

在每一个计算步中，将位移增量分量分别与节理接触面法向与切向刚度相乘即可算得各力的分量

增量，则力分量更新为

$$\begin{cases} F_n' = F_n + \bar{k}_n A \Delta\delta_n \\ F_s' = F_s - \bar{k}_s A \Delta\delta_s \end{cases} \tag{9}$$

节理的切向黏结强度 τ_c 遵从库仑准则，由黏聚力 c_b 和内摩擦角 ϕ_b 及正应力 $\sigma(\sigma = F_n/A)$ 决定。

具黏结特性的节理，接触面法向力小于节理法向黏结强度极限时（即 $F_n \leqslant -\sigma_c A$），节理黏结发生拉伸破坏，产生拉伸微裂纹；而接触面切向应力超过抗剪强度极限时（即 $F_s > \tau_c A$），黏结发生剪切破坏，产生剪切微裂纹。

2　颗粒流细观参数标定

为了颗粒流试验能够模拟岩体的力学行为，需要通过不断改变细观参数进行与室内力学试验相匹配的颗粒流数值试验，即细观参数标定。

2.1　灰岩细观结构特征

由于矿物晶体之间的胶结强度各不相同，采用统一的细观参数构建所有颗粒间接触模型，难以反映不同矿物颗粒组合影响岩石强度的差异。因此，非常有必要基于细观矿物组合特征，按一定比例建立不同颗粒间的接触模型。

本研究选取新鲜的灰岩试样，将其切割并打磨成厚度为 30 μm 的薄片，利用加拿大树胶将其平整固定于玻片上而制成岩石薄片，再利用茜素红-S 染色剂对薄片进行染色（方解石被染为深红色），置于偏光显微镜透射光下进行鉴定分析。鉴定结果表明，岩石试样为细晶含石英灰岩，呈细粒结构，颗粒间紧密接触，为颗粒支撑类型和以亮晶方解石胶结物为主的接触式胶结（图2）。

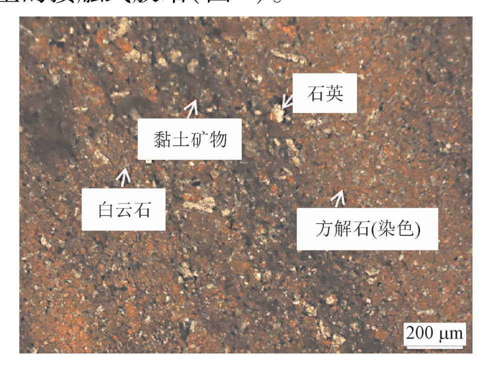


图2　偏光显微镜下灰岩细观矿物特征

Fig. 2　Microscopic characteristics of limestone under polarizing microscope

灰岩主要矿物成分为方解石，含量 88%；还有少量石英和黏土矿物（陆源物质）等，含量分别为 9% 和 3%，零星分布于方解石中。

2.2　室内岩石力学试验

为确保颗粒流离散元试验能准确反映溶蚀岩体的力学行为，需要获取岩体基本力学参数，以此作为细观标定的参考依据。首先，选取完整性较好的灰岩制成 50 mm × 100 mm（直径 × 高）的标准圆柱试样，采用应力控制（速率为 0.5～1.0 MPa/s）的方式在伺服压力机进行单轴压缩试验，获取单轴抗压强度 σ_c、弹性模量 E 和泊松比 v；其次，选完整性较好的灰岩岩块制成 50 mm × 25 mm（直径 × 高）标准圆柱试样，采用速率为 0.1 MPa/s 的应力控制在伺服压力机进行巴西劈裂试验获取单轴抗拉强度 σ_t，如图3(a)所示。

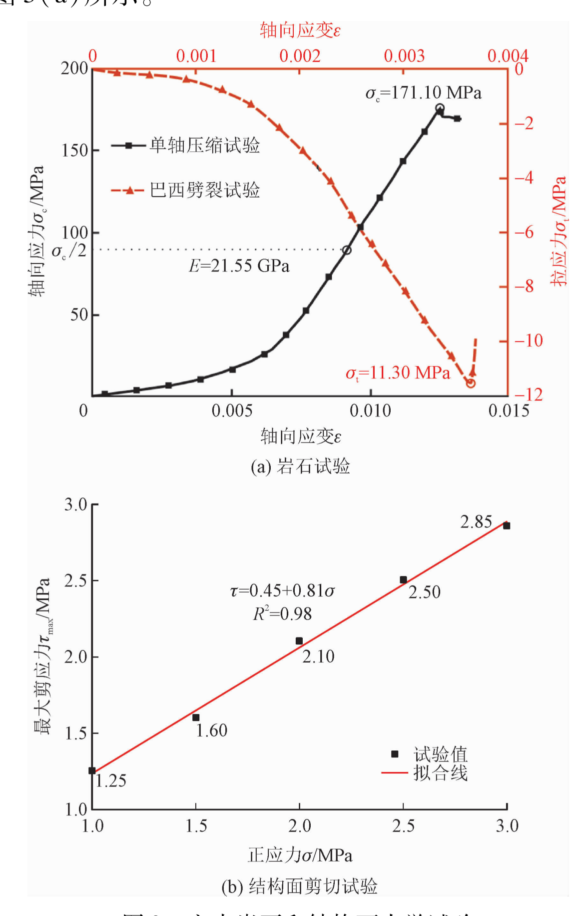


图3　室内岩石和结构面力学试验

Fig. 3　Indoor mechanical tests of rock and discontinuity

最后，采集含结构面的灰岩试样，将其切割打磨成长宽高为 50 mm × 50 mm × 50 mm 的方样，利用便携式直剪仪进行剪切试验，采用正应力恒定，逐级施加剪应力，每 30 s 施加一级，直至试样破坏。通过拟合抗剪强度-正应力关系曲线求取结构面抗剪强度

参数黏聚力 C 和内摩擦角 φ，如图 3(b)所示。室内试验结果为：单轴抗压强度为 171.10 kPa、弹性模量为21.55 GPa、泊松比为 0.19 和抗拉强度为 11.30 kPa，结构面黏聚力为0.45 MPa，内摩擦角约为 39°。单轴压缩试验试件的破坏形态呈典型柱状劈裂脆性拉破坏形式，而含结构面直剪试验岩石试件呈剪切破坏形式。

2.3　颗粒流匹配试验细观标定

2.3.1　模型建立

为准确获取颗粒流的细观力学参数，需要利用颗粒流匹配试验进行细观参数标定。根据灰岩细观矿物结构和矿物含量特征(图 2)，将矿物粒径放大一定比例后，采用自动元胞机方法[22]建立与室内力学试验试样尺寸一致的匹配试验颗粒模型(图 4a)，再将颗粒及颗粒间赋予接触模型，即全部非裂隙面颗粒赋予平行黏结模型(PBM)，而在用于剪切试验的试样中预制一条贯穿的裂隙面，裂隙面两侧颗粒间接触采用光滑节理模型(SJM)，从而建立了单轴压缩匹配试验、巴西劈裂试验和结构面剪切试验的接触模型(图 4b)。

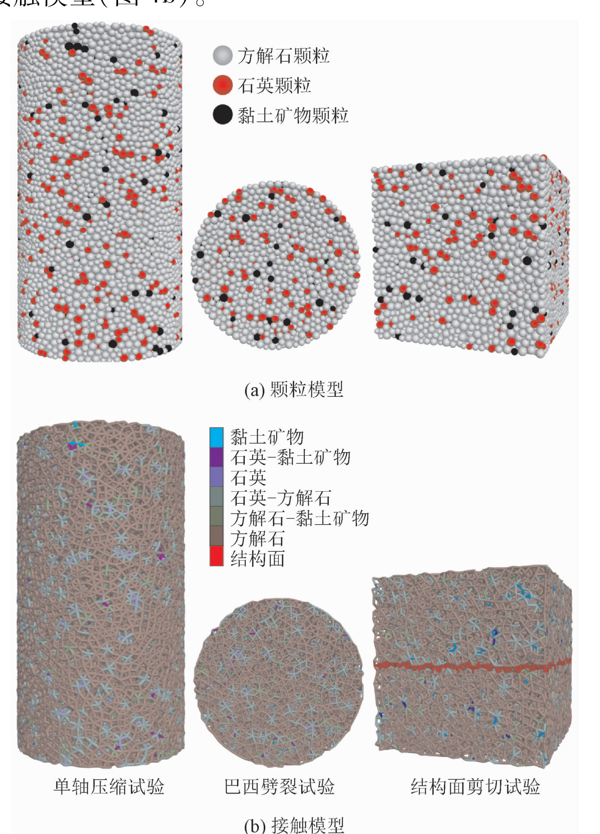


图 4　数值匹配试验颗粒及其接触模型

Fig. 4　Particle and contact models of numerical matching test

2.3.2　模拟试验细观标定

在单轴压缩数值试验中，采用模型顶底部的墙体(wall)作为试件的加载板，墙体与颗粒之间为线性接触模型，摩擦系数为 0。试验时，采用应变率为 5×10^{-5}/s 进行控制，并监测加载过程中的应力应变以及泊松比的变化，提取最大单轴抗压强度 σ_c，并以 $\sigma_c/2$ 处的切线模量作为弹性模量 E；同理，巴西劈裂数值试验以应变率 0.5×10^{-5}/s 控制进行试验。而在进行含结构面试件的剪切试验时，先对试样施加正应力，然后设定对剪切盒施加剪切应变率为 0.2。

以室内岩石力学试验参数和试件破坏类型为依据，通过不断调整细观参数进行模拟，最终获得了与室内试验相匹配的宏观力学参数(表 1)、应力应变曲线(图 5)和试件破坏类型(图 6)。

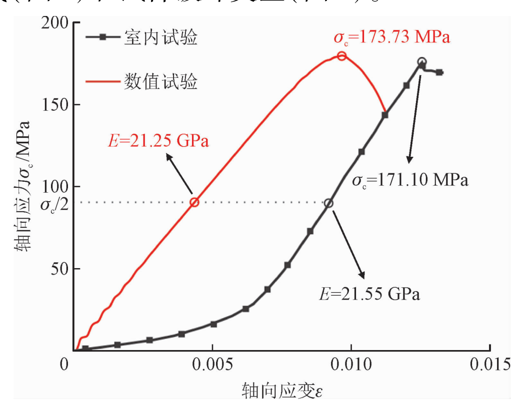


图 5　岩石数值匹配试验应力应变曲线图

Fig. 5　Stress strain curve of numerical matching test

表 1　室内试验与数值试验宏观力学参数对比

Tab. 1　Comparison of macro mechanical parameters between laboratory and numerical test

力学参数及单位	室内试验	数值试验
抗压强度 σ_c/MPa	171.1	173.74
弹性模量 E /GPa	21.55	21.25
泊松比 v	0.19	0.19
抗拉强度 σ_t/MPa	11.30	11.31
强度比 σ_c/σ_t	15.14	15.36
内聚力 C /MPa	0.45	0.44
内摩擦角 φ /(°)	39.00	39.00

由此可知，以细观力学参数(表 2)得到的数值试验宏观力学参数与岩石试件室内试验与相近(参数误差均在 ±0.022 以内)；单轴压缩条件下的应力应变曲线图中，数值试验中岩石为理想弹脆性，而实际试验中压密阶段的单轴压缩和巴西劈裂试验均呈

现相同的脆性拉破坏形式,直剪试验试件呈相同的剪切破坏形式,表明模拟结果均与室内试验一致。因此,颗粒流细观力学参数(表 2)能够反映溶蚀岩体的力学行为。

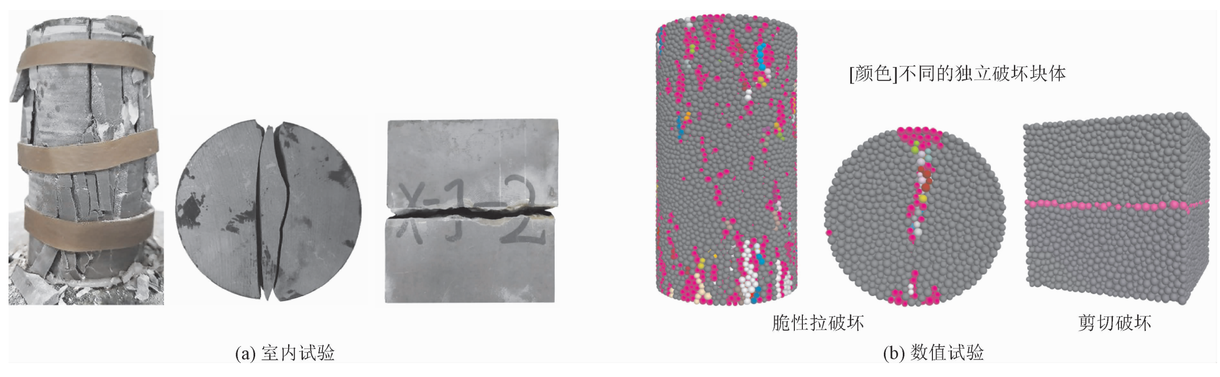


图 6 室内试验与数值破坏形式对比

Fig. 6 The comparison between the laboratory test and the numerical test

表 2 岩体颗粒及其接触模型细观参数

Tab. 2 Mesoscopic parameters of rock mass particles and contact model

类型	参数	单位	接触范围	值
颗粒	半径比 R_{max}/R_{min}	–	全部颗粒	1.66
	最小半径 R_{min}	cm		0.66
	摩擦系数 μ	–		0.60
改进 PBM	杨氏模量 $\overline{E}_c$	GPa	全部颗粒	25.0
	刚度比 $\overline{K}$	–		2.0
	软化系数 β	–		14.0
	内摩擦角 $\overline{\varphi}$	(°)		58.0
	抗拉强度 $\overline{\sigma}_t$	MPa	方解石	6.72
			石英	7.90
			黏土矿物	4.74
			方解石-石英	6.32
			方解石-黏土	4.35
			石英-黏土	3.95
	内聚力 $\overline{C}$	MPa	方解石	93.5
			石英	110.0
			黏土矿物	66.0
			方解石-石英	88.0
			方解石-黏土矿物	60.5
			石英-黏土矿物	55.0
SJM	法向刚度 $\overline{K}_n$	GPa · m^{-1}	结构面附近	30.0
	切向刚度 $\overline{K}_s$	GPa · m^{-1}		20.0
	摩擦系数 μ	–		0.6
	内摩擦角 φ_b	(°)		45.0
	剪胀角 Ψ	(°)		5.0
	抗拉强度 σ_t	MPa		0.1
	内聚力 C_b	MPa		0.15

3　溶蚀岩体单轴压缩试验模拟

3.1　岩体结构面参数统计

研究区内的岩体结构面通常为 1 组层面和 2 组节理面。通过布设测线和测窗法对研究区溶蚀岩体结构面特征参数进行测量和统计。对约 300 条结构面采用概率统计法分析发现，该结构面倾向和倾角主要服从正态分布，而迹长和间距服从负指数分布（表 3）。

表 3　溶蚀岩体结构面参数

Tab. 3　Discontinuity parameters of dissolution rock mass

结构面	正态分布		负指数分布	
	倾向/(°)	倾角/(°)	迹长/m	间距/m
层理面	215 ±0	15 ±0	–	0.16 ±0.08
节理 1	189.90 ±18.97	84.26 ±2.83	0.16 ±0.10	0.15 ±008
节理 2	305.75 ±15.92	86.46 ±3.46	0.16 ±0.06	0.22 ±0.02

3.2　等效溶蚀岩体模型建立

由于岩体具有尺寸效应，需确定其表征单元体积（representative elemental volume，REV）。据结构面参数及分布（表 3），借助裂隙建模软件将不同尺寸的结构面网络耦合于颗粒流中，建立等效节理岩体进行力学试验模拟。当岩体力学性质趋于稳定时，即可确定该最小表征单元体的尺寸。数值试验表明，研究区的 REV 约为 1 m ×1 m ×2 m（图 7a）。基于岩体表征单元体，采用与匹配试验同样的方法和参数建立颗粒模型（图 7b），并赋予各接触模型，建立等效节理岩体模型（图 7c）。

描述岩溶（dissolution）发育程度可以采用体溶蚀率 k 表示。本研究溶蚀率 k 为体溶蚀率，为溶蚀空洞所占体积（V_k）与总体积（V）之比

$$k = \frac{V_k}{V} \times 100\% \tag{10}$$

溶蚀孔洞采用自动元胞机方法[22]生成，即在模型中的方解石颗粒中投放一定比例的随机种子，再通过聚类算法在种子颗粒周围随机捕获颗粒，最后将这些颗粒进行溶蚀剔除，分别建立溶蚀率 k 为 0%、5%、10%、15%、20% 和 25% 的 6 种等效的孔隙型溶蚀岩体模型，如图 7（d）所示。

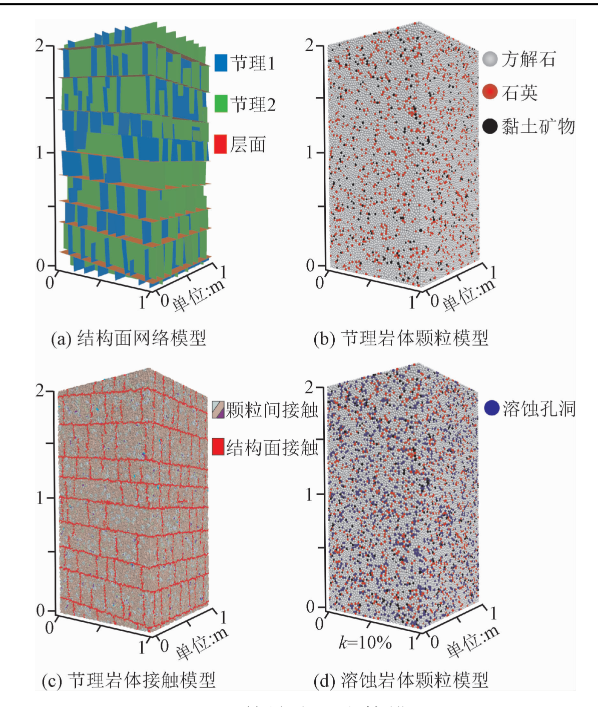


图 7　等效溶蚀岩体模型

Fig. 7　Equivalent model of dissolution rock mass

3.3　单轴压缩数值试验

首先，在岩体模型顶部和底部创建加载板，加载板与溶蚀岩体模型之间的摩擦系数为 0，以消除试验的端面摩擦；上下加载板应变率为 0.1；其次，在考虑试件端部局部应力集中效应后，利用 fish 实时监测和记录试件应力应变等。其中，试件的轴向应力为所受的总接触力除以面积，轴向应变为轴向位移与试件初始高度之比；最后，当轴向应力降低至峰值应力 80% 时，停止加载。

4　试验结果与讨论

4.1　溶蚀岩体细观微裂纹演化特征

岩体力学强度是通过颗粒间接触模型反映，即由平行黏结模型和光滑节理模型来分别反映颗粒间的胶结，岩体内平行黏结的断裂可认为是岩石内微裂纹的产生，而节理黏结的断裂可认为是结构面微裂纹的产生与拓展。

在单轴压缩条件下，不同溶蚀率（k）岩体 REV 的岩块和结构面累计微裂纹数目 N 随轴向应变 ε 的变化关系如图 8 所示。由图可知，在单轴加载前期，结构面微裂纹产生或扩展数量急剧增加，而岩块内部的微裂纹缓慢增加；随着轴向应变不断增大，岩块

内部微裂纹呈指数迅速增加，而结构面趋于稳定，这表明在单轴压缩条件下，岩体内结构面首先破坏，随后转为岩块内部微裂纹损伤产生，进而导致岩块内部强度降低。

由图 8(a)可知，相同溶蚀率 k 时，岩块内部的拉裂纹数 N_t 的数量级为 10^5，是剪切裂纹数 N_τ 的 10 ~20 倍，说明岩块以脆性拉破坏为主，损伤体现为拉裂纹产生和拓展；相同轴向应变时，随着溶蚀率的增加，拉裂纹数量越大，增速越快，而剪切微裂纹变化无明显规律，表明溶蚀主要影响岩块内部的拉裂纹产生与扩展。由图 8(b)可知，相同溶蚀率 k 时，剪切微裂纹数 N_t 为 10^5 数量级，是拉裂纹数 N_τ 约 50 倍，表明结构面破坏以剪破坏为主，产生大量剪切微裂纹；相同的轴向应变条件下，剪切微裂纹随溶蚀率的增加而减少，而拉破坏则也表现出无明显规律，表明岩体结构面的剪切裂纹形成受溶蚀作用的影响。

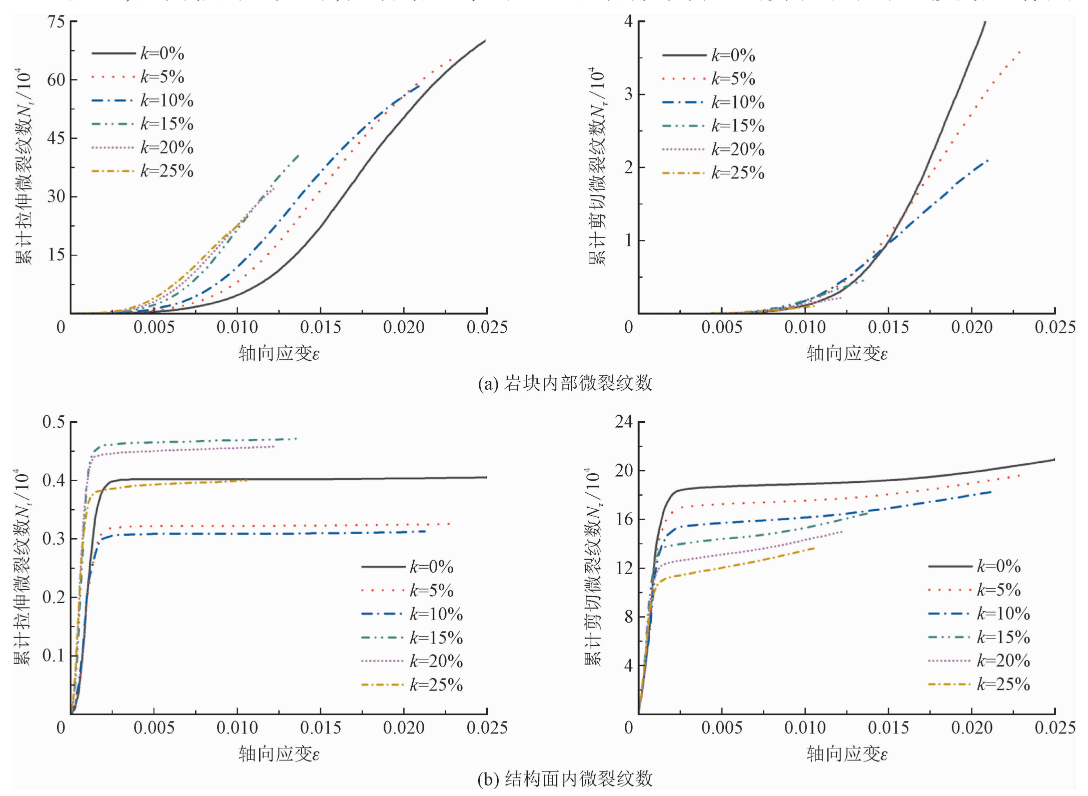


图 8 溶蚀岩体中岩块和结构面微裂纹数变化

Fig. 8 Variation of the number of microcracks of rock blocks and discontinuities in dissolution rock mass

4.2 溶蚀岩体宏观变形破坏特征

单轴压缩条件下，不同溶蚀率的孔隙型岩体应力-应变曲线与溶蚀率 $k = 5\%$ 的累计微裂纹总数 N 关系如图 9 所示。由图可知，随溶蚀率增加，岩体的峰值强度和峰值应变不断下降。

岩体变形破坏由结构面和岩块变形破坏体现[4]，当岩体结构面并不能直接形成贯通性破坏面时，岩体的软弱结构面黏结首先断裂而使得微裂纹激增，即结构面快速破坏阶段(OA)；随后岩块发生弹性变形，内微裂纹几乎不变，岩体应力-应变呈一定线性关系，为岩块线弹性变形阶段(AB)；此后岩块屈服发生塑性变形，岩体进入岩块塑性变形阶段(BC)；最后，当应力超过单轴抗压强度时，岩体进入完全破坏阶段(CD)。

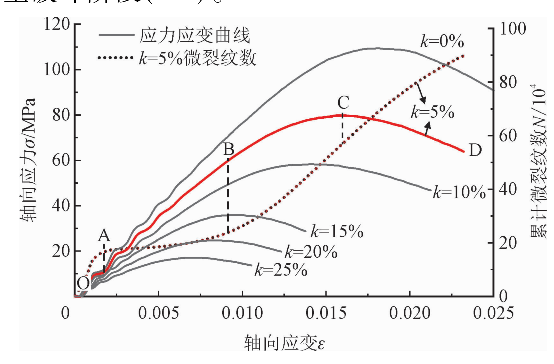


图 9 孔隙型溶蚀岩体的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves ofdissolution rock mass

岩体破坏以岩体分裂为块体和形成贯通破坏面为标志[3]。由单轴压缩试验的溶蚀岩体的破坏形态特征图(图 10)可知，碎块数量大、尺寸小，微裂纹遍

布岩体,表明岩体各部分受力均匀,能耗散较多能量;随着溶蚀率的增加,破坏碎块数量减少,碎块尺寸增大,微裂纹呈集中分布,岩体中因单轴加载产生的裂纹集中于洞隙附近,导致岩体从均匀性破坏的转化为局部的结构性(结构面和溶蚀洞隙等)破坏,进而形成贯通性破坏面,降低了岩体的强度。

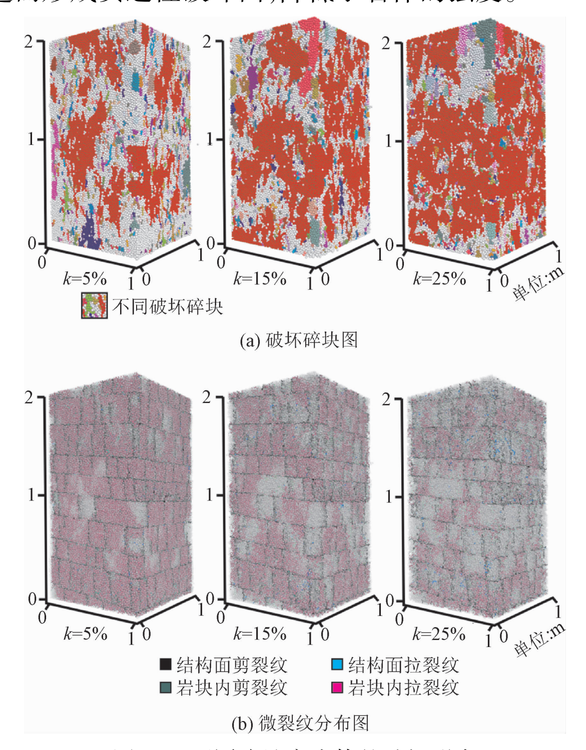


图 10　不同溶蚀率岩体的破坏形态

Fig. 10　Failure modes of rock mass with different dissolution rates

4.3　溶蚀率与岩体力学强度参数的关系

目前,通过室内岩石力学试验方法获得溶蚀岩体强度参数存在很大困难。因此,通过建立溶蚀率与岩体强度参数的关系,是解决溶蚀岩体强度参数获取困难的重要途径。

单轴抗压强度和变形模量是两个常用的参数,通过单轴压缩条件下不同溶蚀率的力学参数试验,获取单轴抗压强度 σ_c 与岩体变形模量 E_m,最后拟合得到溶蚀率与抗压强度和变形模量的函数关系(图 11)。由图可知,溶蚀发育程度较低时,引起岩体的单轴抗压强度降低幅度较大;当溶蚀率不断增加,其降低幅度不断减小,该规律与朱雷等[33]利用 FLAC^{3D}研究溶蚀砾岩得到的抗剪强度与溶蚀程度关系基本一致。孔隙型溶蚀岩体的单轴抗压强度 σ_c 和溶蚀率 k 呈负指数关系,即

$$\sigma_c = \sigma_{c0} e^{-7.16k} \tag{11}$$

式中,σ_{c0}为节理岩体单轴抗压强度,单位为 MPa。

随着溶蚀发育程度不断增大,溶蚀岩体的变形模量呈线性降低,斜率为 -17.54,即变形模量 E_m 与溶蚀率 k 呈反比例关系为

$$E_m = E_{m0} - 17.54k \tag{12}$$

式中,E_{m0}为节理岩体变形模量,单位为 GPa。

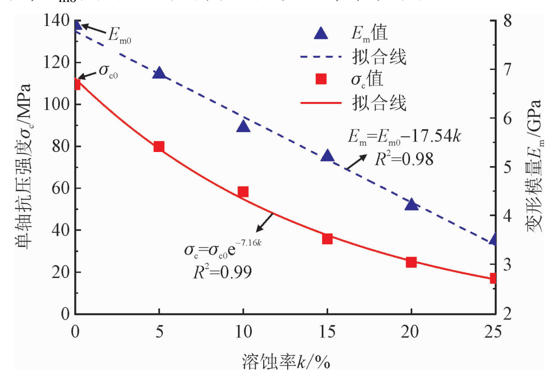


图 11　溶蚀率与溶蚀岩体力学参数的函数关系

Fig. 11　Function relationship between dissolution rate and mechanical parameters of the rock mass

5　结　论

本研究以贵州喀斯特地区溶蚀岩体为研究对象,基于岩石矿物含量和代表性岩体结构面特征,利用三维颗粒流离散元法研究单轴压缩条件下孔隙型溶蚀岩体的力学特性,得出以下结论。

1)采用改进的平行黏结模型,基于岩石细观矿物特征和表征单元体结构面网络,并利用多宏观参数标定可建立等效节理岩体模型;在节理岩体模型中采用元胞自动机算法将部分溶蚀颗粒剔除,可建立随机溶蚀岩体模型。

2)单轴加载初期,岩体内结构面剪切微裂纹数激增,而岩块内微裂纹为零;随着应变逐渐增大,岩块内以拉裂纹为主,微裂纹数呈指数增加。

3)随着溶蚀率增加,岩体内微裂纹总数不断降低;相同轴向应变时,随溶蚀率增加,岩块内拉伸微裂纹增加,而结构面剪切微裂纹减少。

4)岩体应力-应变曲线可分为结构面快速破坏、岩块弹性变形、岩块塑性变形和岩体完全破坏等 4 个阶段;随溶蚀率增加,峰值强度和和峰值应变不断降低,且岩体从均匀性破坏转为局部结构性破坏。

5)孔隙型溶蚀岩体单轴抗压强度和变形模量参数与溶蚀率分别呈负指数和反比函数关系,可用于估算溶蚀岩体的力学参数,这为解决溶蚀岩体强度室内试验难以获取的问题提供新的途径。

参考文献:

[1] 黄金城,唐丽云. 节理岩体强度参数损伤张量模型多维估算[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1298-1304.
HUANG Jincheng, TANG Liyun. Multi-dimensional estimation of strength parameters of jointed rock based on damage tensor model [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018, 14(5):1298-1304(in Chinese).

[2] 何满潮,薛廷河,彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):225-229.
HE Manchao, XUE Tinghe, PENG Yanfei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2001, 20(2):225-229(in Chinese).

[3] 孙广忠. 岩体力学的进展——岩体结构力学[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(2):112-116.
SUN Guangzhong. Advance in rockmass mechanics—rockmass structural mechanics[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 1991, 10(2):112-116(in Chinese).

[4] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[5] 光耀华. 岩溶地区工程地质研究的若干新进展概述[J]. 中国岩溶,1998,17(4):70-75.
GUANG Yaohua. An introduction to the progress of the geologic engineering researches in karst regions[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(4):70-75(in Chinese).

[6] FORD D, WILLIAMS P. Dissolution geomorphology and hydrology [M]. [S. l.]: [s. n.], 1989:1-16.

[7] 朱永生,李鹏飞. Hoek-Brown 强度准则研究进展及岩体力学参数取值[J]. 现代隧道技术,2020,57(1):8-17.
ZHU Yongsheng, LI Pengfei. Research progress of Hoek-Brown strength criterion and determination of mechanical parameters of rock mass[J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(1):8-17 (in Chinese).

[8] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2019, 11(3):445-463.

[9] 刘佳明,孙少锐,张中行,等. 交叉结构面对岩体力学特性的弱化效应[J]. 中山大学学报(自然科学版),2019,58(3):118-130.
LIU Jiaming, SUN Shaorui, ZHANG Zhongxing, et al. Weakening effect of crossed joints on the mechanical characteristics of rock mass[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2019, 58(3):118-130(in Chinese).

[10] 张志强,陈方方,李宁,等. 两共面预制裂纹试样应力场特征与破坏模式研究[J]. 应用力学学报,2019,36(5):1234-1241.
ZHANG Zhiqiang, CHEN Fangfang, LI Ning, et al. Failure mode and stress field for sample with two coplane pre-crack[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(5):1234-1241(in Chinese).

[11] 张国凯,李海波,夏祥,等. 节理特性对岩体力学性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(12):4197-4204.
ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Influence of joint features on mechanical properties of rock mass[J]. Journal of Central South University(science and technology), 2016, 47(12):4197-4204(in Chinese).

[12] 聂德新. 岩体结构理论在中国的广泛、成功应用及进展[J]. 工程地质学报,2014,22(4):625-637.
NIE Dexin. Widely successful application and advancement of the rock mass structure theory in China[J]. Journal of engineering geology, 2014, 22(4):625-637(in Chinese).

[13] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶,2013,32(4):419-432.
LUO Xiaojie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4):419-432(in Chinese).

[14] 杨先寿,蒋忠诚. 贵州表层岩溶边坡失稳的模式、机理及评价[J]. 中国岩溶,1998,17(4):62-69.
YANG Xianshou, JIANG Zhongcheng. Model and mechanism of epikarst slope distabilization in Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(4):62-69(in Chinese).

[15] 张菊明,王思敬,曾钱帮,等. 溶蚀岩体三维随机洞体数学模型的设计[J]. 工程地质学报,2004,12(3):237-242.
ZHANG Juming, WANG Sijing, ZENG Qianbang, et al. Mathematic model design for three-dimensional random caverns of karstified rock[J]. Journal of engineering geology, 2004, 12(3):237-242(in Chinese).

[16] 陈祥军. 基于随机结构模型的溶蚀岩体渗漏分析在水布垭工程中的应用[D]. 南京:河海大学,2007.

[17] 陈祥军,马凤山,王思敬,等. 溶蚀岩体随机结构模型建立及其在岩体渗漏评价中的应用[J]. 工程地质学报,2004,12(2):193-198.
CHEN Xiangjun, MA Fengshan, WANG Sijing, et al. The stochastic structure model of karstic rock and its applications in leakage evaluation[J]. Journal of engineering geology, 2004, 12(2):193-198 (in Chinese).

[18] 刘宏,赵跃平,邬相国,等. 强溶蚀带岩溶地基稳定性研究[J]. 人民长江,2009,40(20):56-58.
LIU Hong, ZHAO Yueping, WU Xiangguo, et al. Research on stability of karst foundation in strong corrosion area[J]. Yangtze river, 2009, 40(20):56-58(in Chinese).

[19] 张社荣,严磊,王超,等. 基于随机有限元法的溶蚀坝基系统建坝适应性评价[J]. 岩土力学,2012,33(2):597-603.
ZHANG Sherong, YAN Lei, WANG Chao, et al. Evaluating adaptability to build dams on dissolution foundation system based on sto-

chastic finite element method[J]. Rock and soil mechanics,2012,33(2):597-603(in Chinese).

[20] 张社荣,王超,孙博. Bayes 约束随机场下坝基溶蚀区随机模拟方法及其影响分析[J]. 岩土力学,2013,34(8):2337-2346.
ZHANG Sherong,WANG Chao,SUN Bo. Stochastic simulation and influence analysis of dissolution dam foundation under Bayes constraint random field[J]. Rock and soil mechanics,2013,34(8):2337-2346(in Chinese).

[21] 石崇,张强,王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[J]. 岩土力学,2018,39(增刊2):36.
SHI Chong,ZHANG Qiang,WANG Shengnian. Particle flow code (PFC5.0) numerical simulation technology and its application[J]. Rock and soil mechanics,2018,39(S2):36(in Chinese).

[22] 黎崇金,李夕兵,李地元. 含孔洞大理岩破坏特性的颗粒流分析[J]. 工程科学学报,2017,39(12):1791-1801.
LI Chongjin,LI Xibing,LI Diyuan. Particle flow analysis of fracture characteristics of marble with a single hole[J]. Chinese journal of engineering,2017,39(12):1791-1801(in Chinese).

[23] 杨圣奇,李尧,黄彦华,等. 单孔圆盘劈裂试验宏细观力学特性颗粒流分析[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(5):984-992.
YANG Shengqi,LI Yao,HUANG Yanhua,et al. Particle flow analysis of macroscopic and microscopic mechanical properties of Brazilian disc containing a hole under splitting test[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2019,48(5):984-992(in Chinese).

[24] 杨圣奇,黄彦华. 双孔洞裂隙砂岩裂纹扩展特征试验与颗粒流模拟[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(3):584-597.
YANG Shengqi, HUANG Yanhua. Experiment and particle flow simulation on crack coalescence behavior of sandstone specimens containing double holes and a single fissure[J]. Journal of basic science and engineering,2014,22(3):584-597(in Chinese).

[25] 张社荣, 王枭华, 王超. 孔隙结构特征及发育程度对溶蚀岩体力学特性的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(10): 1018-1028.
ZHANG Sherong, WANG Xiaohua, WANG Chao. Effects of pore structure and its development degree on dissolution rock mechanical characteristics[J]. Journal of Tianjin University(science and technology),2017,50(10):1018-1028(in Chinese).

[26] CUNDALL P A,STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique,1979,29(1):47-65.

[27] LIAKAS S,O'SULLIVAN C,SAROGLOU C. Influence of heterogeneity on rock strength and stiffness using discrete element method and parallel bond model[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2017,9(4):575-584.

[28] POTYONDY D O. Parallel-bond refinements to match macroproperties of hard rock[C]//Continuum and Distinct Element Modeling in Geomechanics — 2011 (Proceedings,2nd International FLAC/DEM Symposium. Minneapolis: Itasca International Inc., 2011: 459-465.

[29] MA Y F,HUANG H Y. DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2018,102:109-119.

[30] MEHRANPOUR M H,KULATILAKE P H S W. Improvements for the smooth joint contact model of the particle flow code and its applications[J]. Computers and geotechnics,2017,87:163-177.

[31] LAMBERT C,COLL C. Discrete modeling of rock joints with a smooth-joint contact model[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2014,6(1):1-12.

[32] 王涛,周炜波,徐大朋,等. 基于光滑节理模型的岩体水力压裂数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(4):500-508.
WANG Tao,ZHOU Weibo,XU Dapeng,et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing of rock mass based on smooth joint model[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2016,49(4):500-508(in Chinese).

[33] 朱雷,王小群,聂德新,等. 基于随机模型溶蚀岩体强度参数研究[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1034-1038.
ZHU Lei, WANG Xiaoqun, NIE Dexin, et al. Stochastic method based evaluation of corrosion rock strength parameters[J]. Journal of engineering geology,2014,22(6):1034-1038(in Chinese).

(编辑　李坤璐)